

TNO-Defensieonderzoek

**AD-A266 815**



TNO-rapport

PML 1993-9

januari 1993

Exemplaar no.: 12

Prins Maurits Laboratorium TNO

Lange Kleiweg 137  
Postbus 45  
2280 AA Rijswijk

Fax 015 - 84 39 91  
Telefoon 015 - 84 28 42

TD  
92-3688 II

De invloed van de stapeling van vaten kruit  
op de veilige opslagtemperatuur

Auteur(s):

J.C. Lont

DO-opdrachtnummer:

R87/KL/001

Rubriceringen

Rubricering bepaald door:

Drs. Ing. J. van den Bos

Rubriceringsdatum:

30-11-1992

Rapport:

ONGERUBRICEERD

Titel:

ONGERUBRICEERD

Samenvatting:

ONGERUBRICEERD

Bijlage(n):

ONGERUBRICEERD

Oplage:

23

Aantal pagina's:

(incl. bijlagen, excl. distr. lijst en RDP)

31

Aantal bijlagen:

1

This document has been approved  
for public release and sale; its  
distribution is unlimited.

**TDCK RAPPORTENCENTRALE**  
Frederikkazerne, gebouw 140  
v/d Burchlaan 31 **MPC 16A**  
TEL. : 070-3166394/6395  
FAX. : (31) 070-3166202  
Postbus 90701  
2509 LS Den Haag **TDCK**

**DTIC**  
**S ELECTE D**  
**A JUL 14 1993**

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt  
door middel van druk, fotokopie, microfilm  
of op welke andere wijze dan ook, zonder  
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-  
opdrachten aan TNO', dan wel de  
betreffende terzake tussen partijen  
gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport  
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

**93-15884**



Nederlandse organisatie voor  
toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

TNO-Defensieonderzoek bestaat uit:  
het Fysisch en Elektronisch Laboratorium TNO,  
het Prins Maurits Laboratorium TNO en het  
Instituut voor Zintuigfysiologie TNO



## Samenvatting

Een veel gebruikt veiligheids criterium voor de opslag van kruit is de veilige diameter. Een opgeslagen pakket kruit mag deze diameter niet overschrijden, opdat de warmte die door langzame ontledingsreacties wordt geproduceerd, snel genoeg naar de omgeving afgevoerd kan worden. Dit criterium wordt gewoonlijk toegepast op de afmeting van een enkele verpakkingseenheid. De afkoeling kan echter belemmerd worden door een dichte stapeling van verpakte eenheden kruit in een opslaggebied, waardoor het systeem toch instabiel kan worden.

Om dit te onderzoeken is een stapel van twee lagen van vijftwintig dicht op elkaar gestapelde vaten kruit gemodelleerd met een eindige elementen methode en de resultaten zijn vergeleken met het gedrag van een enkel vat. De warmtestroming in de ruimte tussen de vaten is gemodelleerd met behulp van een effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van 1 W/mK.

De stapel had een 10 tot 15°C lagere kritische omgevingstemperatuur dan een enkel vat. De laagste kritische omgevingstemperatuur die is gevonden was circa 50°C. De (effectieve) warmtegeleidingscoëfficiënten van het kruit en de lucht tussen de vaten zijn de belangrijkste parameters die de thermische stabiliteit van de stapel bepalen.

## Summary

A commonly used safety criterion for the storage of gunpowder is the critical diameter. This diameter must not be exceeded by a stored package of gunpowder to ensure that the heat production caused by slow decomposition reactions can be compensated by loss of heat to the surroundings. This safety criterion is normally applied to the size of a single package. However, the cooling effect can be decreased by the close stacking of packages in a storage area, which could render the system unstable.

A stack of two layers of twenty-five closely packed drums of powder was modelled using a finite element method and the results were compared with the behaviour of a single drum. The heat flow in the space between the drums was modelled using an effective conductivity of 1 W/mK.

The stack had a 10 to 15°C lower critical ambient temperature as compared to the single drum. Critical ambient temperatures as low as approximately 50°C were encountered. The (effective) conductivity of the powder and the air between the drums are the most important factors that determine the thermal stability of the stack.

## INHOUDSOPGAVE

	SAMENVATTING/SUMMARY	2
	INHOUDSOPGAVE	3
1	INLEIDING	4
2	THEORIE	5
2.1	Thermische-explosietheorie	5
2.2	Warmtetransport in een vat met kruit	6
2.3	Eindige elementen methode	7
3	BESCHRIJVING VAN HET MODEL	7
3.1	Beschrijving van de opslagsituatie	7
3.2	Beschrijving van het rekenrooster	8
3.3	Toegepaste fysische gegevens van het kruit	12
3.4	Gebruikte hard- en software	12
4	RESULTATEN	13
4.1	Invloed van stapeling op de kritische omgevingstemperatuur	13
4.2	Verfijning van de berekening van de kritische temperatuur	18
4.3	Gevoeligheidsanalyse	19
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	23
5.1	Conclusies	23
5.2	Aanbevelingen	25
6	ONDERTEKENING	26
7	REFERENTIES	27
BIJLAGE 1	OVERZICHT VAN SIMULATIERUNS	

DTIC QUALITY INSPECTED 8

Accession For		
NTIS	CRA&I	J
DTIC	TAC	
Unannounced		
Justification		
By		
Distribution /		
Availability Codes		
Dist	Avail and/or Special	
A-1		

## 1 INLEIDING

Bij de normale opslagtemperatuur vertoont kruit een zeer langzame, maar niet verwaarloosbare, ontledingsreactie. *Hierbij komt warmte vrij, waardoor het kruit in temperatuur stijgt. Als deze warmte niet snel genoeg wordt afgevoerd, is het gevaar van spontane ontbranding aanwezig.* De omvang van een pakket kruit in de vorm waarin het wordt opgeslagen, bepaalt mede of de geproduceerde warmte goed kan worden afgevoerd.

De stabiliteit van kruit kan men bepalen door de warmteontwikkeling van het kruit te meten [1]. Daarmee wordt de veilige diameter bepaald, die niet overschreden mag worden voor een opgeslagen eenheid kruit. In de praktijk liggen deze eenheden gestapeld in een bepaalde verpakking. Hoewel de eenheden zelf een veilige diameter hebben is het de vraag in hoeverre dat criterium nog van waarde is bij stapeling. De buitenste eenheden vormen namelijk een soort "warmte-isolatie" voor de binnenste eenheden.

In opdracht van Bureau Hinderwetzaken van de Directie Materieel van de Koninklijke Landmacht is de invloed van de stapeling van kruit theoretisch onderzocht. Met behulp van het eindige elementen programma "Abaqus" is een computermodel opgesteld van cilindervormige vaten (fiberdrums) die in twee lagen van vijf bij vijf vaten zijn opgestapeld. Een beperking van het model is, dat de stroming van lucht tussen de vaten niet uitgerekend kan worden. Daarom is het warmte-transport dat door luchtstromingen veroorzaakt wordt benaderd door het te beschrijven als een warmtegeleidingsmechanisme.

Door middel van simulaties is nagegaan hoe hoog de omgevingstemperatuur kan zijn, zonder dat er een wegloopleactie optreedt. Dit is vergeleken met de situatie van een los, niet-gestapeld vat kruit. Daarbij is gekeken naar het temperatuurverloop in de tijd, en naar het temperatuurprofiel *dat uiteindelijk in de stapel ontstaat, als de situatie thermisch stabiel is.*

In de eerste stap is de stapel met een eenvoudig, tweedimensionaal model beschreven. In de tweede stap is het model uitgebreid tot een volledig driedimensionaal model. Tevens is de gevoeligheid van het model voor de waarde van de gebruikte fysische parameters onderzocht.

## 2 THEORIE

### 2.1 Thermische-explosietheorie

In het hier gebruikte model wordt uitgegaan van een reactiekinetiek volgens vergelijking (1). Dit is een Arrhenius vergelijking voor een nulde-orde reactie.

$$q = Q_0 \exp(-E/RT) \quad [\text{W/kg}] \quad (1)$$

Hierin is  $q$  de warmteproductie [ $\text{W/kg}$ ],  $Q_0$  de warmteproductiefactor [ $\text{W/kg}$ ],  $E$  de activeeringsenergie [ $\text{J/mol}$ ],  $R$  de gasconstante [ $\text{J/mol K}$ ] en  $T$  de absolute temperatuur [ $\text{K}$ ].

Het warmtetransport door een materiaal wordt bepaald door de warmtegeleidingscoëfficiënt en de temperatuurgradiënt in het materiaal.

$$J = -l \frac{dT}{dx} \left[ \text{W/m}^2 \right] \quad (2)$$

$J$  is de warmteflux [ $\text{W/m}^2$ ],  $l$  is de warmtegeleidingscoëfficiënt [ $\text{W/mK}$ ] en  $dT/dx$  de gradiënt van de temperatuur [ $\text{K/m}$ ].

De warmteoverdracht van het kruitvat naar de lucht er omheen wordt beheerst door vergelijking (3).

$$J = h (T_k - T_A) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

Hierin is  $h$  de warmteoverdrachtscoëfficiënt [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ] en  $T_k$  en  $T_A$  zijn respectievelijk de temperatuur van de buitenkant van het kruitvat en de temperatuur in de directe omgeving van het vat.

Het verloop van de temperatuur in de tijd volgt uit de energiebalans:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + C_p \cdot q \quad [\text{K/s}] \quad (4)$$

Voor het een-dimensionale geval leidt deze tot de volgende partiële differentiaalvergelijking.  $t$  is de tijd [s] en  $x$  is de ruimtelijke coördinaat [m]. De thermische diffusiviteit  $a$  is gedefinieerd als  $a = 1/(p \cdot C_p)$ ;  $p$  is de dichtheid [ $\text{kg/m}^3$ ],  $C_p$  is de soortelijke warmte [ $\text{J/kgK}$ ] en  $q$  is de warmteproductie [ $\text{W/kg}$ ].

Met de Thermische Explosie Theorie, zoals beschreven in [2], kan aangetoond worden dat een dergelijk systeem instabiel is als de omgevingstemperatuur boven een bepaalde kritische waarde ligt. Voor een aantal eenvoudige geometrieën kan de kritische omgevingstemperatuur uitgerekend worden. Voor een oneindig lange cilinder gaat dat als volgt. De dimensieloze grootte  $d$  wordt gedefinieerd met vergelijking (5) ( $r$  is de straal [m]).

$$d = (E/R T_A^2) (r^2 Q_o p/l) \exp(-E/R T_A) \quad (5)$$

Volgens de Thermische Explosie Theorie is een systeem stabiel, indien  $d$  beneden de kritische waarde ( $d_C$ ) ligt. In figuur 2.5 van Bowes [2] wordt  $d_C$  gegeven als functie van het Biot-getal ( $hr/l$ ). Hiermee kan de kritische omgevingstemperatuur berekend worden.

## 2.2 Warmtetransport in een vat met kruit

Voor een ingewikkelde geometrie, zoals een stapel vaten, bestaat er geen formule om de kritische omgevingstemperatuur uit te rekenen. Bovendien is het warmtetransport tussen de vaten kruit veel complexer dan het warmtetransport door het kruit zelf. In de tussenruimtes tussen de vaten treedt niet alleen warmtegeleiding op, maar ook convectie. De lucht vertoont een complexe stroming en zorgt daarmee voor warmte-uitwisseling tussen hete en koelere plaatsen. Deze luchtstromingen worden mede veroorzaakt door de dichtheidsverschillen die het gevolg zijn van temperatuurverschillen. De mate van warmte-uitwisseling tussen de vaten is daarom niet op voorhand bekend, maar zal liggen tussen twee uitersten:

- de verpakkingen (en tussenruimtes) zijn zeer sterk warmtegeleidend. In dat geval zal de stapel geen noemenswaardige warmteweerstand vertonen, zodat de verpakkingen met kruit als losse eenheden beschouwd kunnen worden, zonder invloed van de stapeling;
- de verpakkingen (en tussenruimtes) zijn sterk isolerend. In dat geval kan het kruit zijn warmte niet kwijt, zodat de temperatuur tot een gevaarlijk niveau zal oplopen, ongeacht de grootte van de stapeling.

### 2.3 Eindige elementen methode

De stapel wordt gesimuleerd met behulp van het software-pakket Abaqus, dat gebaseerd is op de eindige elementen methode. Varianten van deze methode zijn toepasbaar op verschillende soorten problemen, bijvoorbeeld sterkteberekeningen, stromingsproblemen en warmtetransportproblemen. Het principe is, dat het te onderzoeken systeem wordt opgedeeld in een groot aantal eenvoudige elementen, zoals kubussen, tetraëders en dergelijke. Deze elementen beïnvloeden elkaar via hun gemeenschappelijke grensvlakken en hoekpunten. Samen vormen al deze elementen een rekenrooster. Als de materiaaleigenschappen en de begin- en randvoorwaarden van alle elementen gedefinieerd zijn, kan het gedrag van het systeem gesimuleerd worden. In ons geval wordt uitgerekend hoe op elk roosterpunt de temperatuur in de tijd verloopt.

## 3 BESCHRIJVING VAN HET MODEL

### 3.1 Beschrijving van de opslagsituatie

In een opslagruimte is kruit opgeslagen in fiberdrums. Dit zijn cilindervormige vaten van een kartonachtig materiaal met een houten deksel (6 mm dik "plywood" = multiplex) dat met een klemband bevestigd is. Het kruit heeft een binnenverpakking van textiel met een plastic zak. Er bestaan verschillende formaten. In het model is uitgegaan van de maten van een veel gebruikt type:

diameter	355 mm
hoogte	630 mm
wanddikte	2,3 mm

Er wordt aangenomen dat het vat 100% gevuld is. Er is geen aparte binnen- en buitenverpakking gemodelleerd, maar de verpakking wordt in het model door één warmteoverdrachtscoëfficiënt gekenmerkt. De waarde van deze warmteoverdrachtscoëfficiënt is  $6.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

De vaten staan gestapeld op pallets die echter niet in het model meegenomen zijn. Het model gaat uit van een constante temperatuur in de opslagruimte (buiten de stapel). Stralingseffecten zijn niet meegenomen, omdat de ervaring leert, dat die bij lage temperaturen een uiterst geringe bijdrage aan het warmtetransport leveren. Het model gaat uit van een stapel van vijf rijen van vijf vaten, die dicht tegen elkaar aan gezet zijn. Er zijn twee lagen boven elkaar gestapeld, zonder tussenruimte (zie figuur 3).

### 3.2 Beschrijving van het rekenrooster

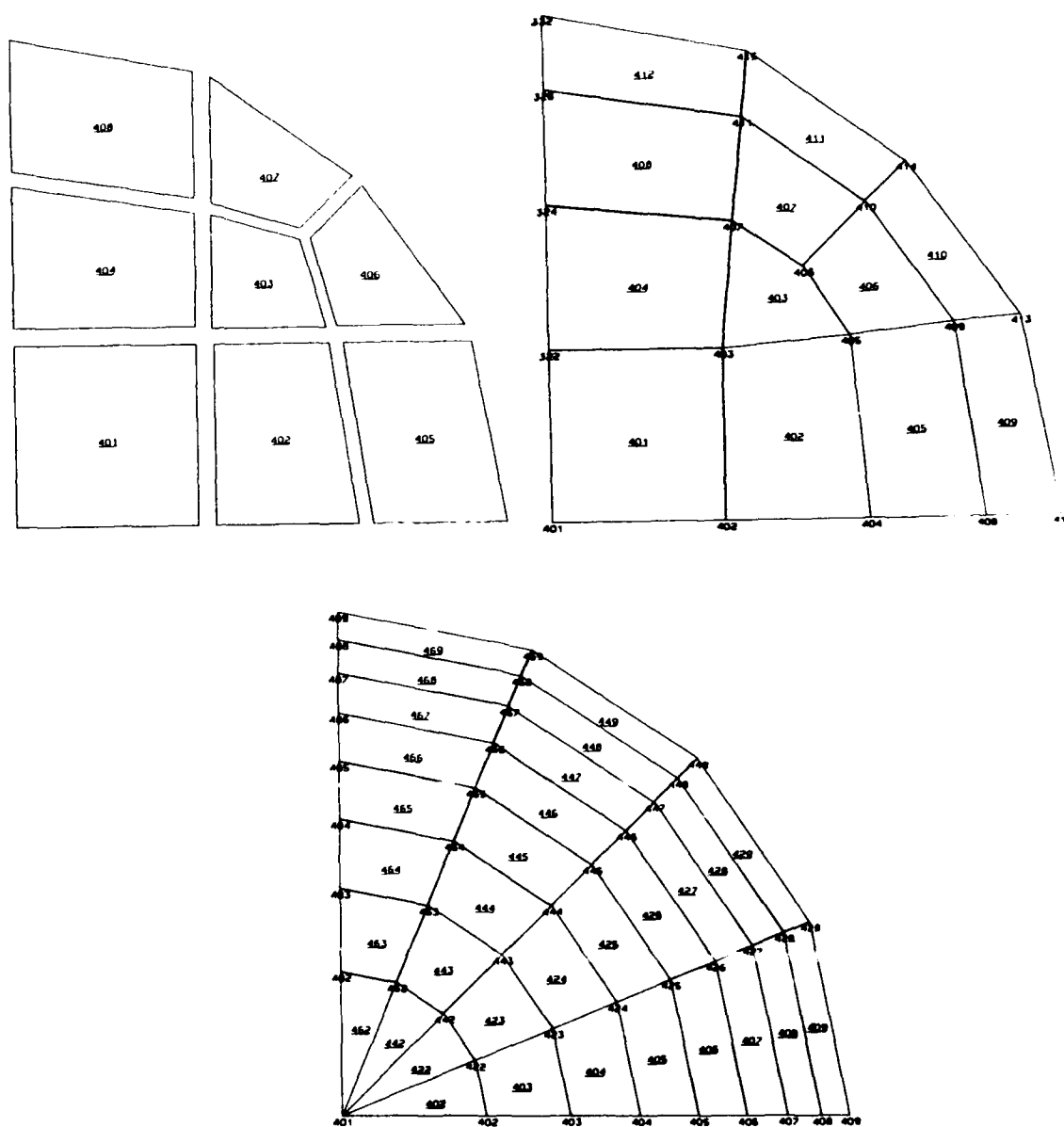
In de eindige elementen methode wordt het te onderzoeken systeem opgedeeld in een aantal elementen van eindige grootte. Hierdoor wordt een rooster (of "grid") gevormd, aan de hand waarvan het systeem wordt doorgerekend. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de symmetrie in het systeem, zodat slechts een representatief deel van het systeem hoeft te worden doorgerekend.

Voor dit onderzoek zijn enkele verschillende grids gebruikt.

In de eerste plaats is een enkel vat gemodelleerd in een twee-dimensionaal model, waarbij wordt aangenomen dat alle warmteafvoer in horizontale richting plaats vindt. Dit komt in rekenkundige zin overeen met de warmtestroming in een oneindig lange cilinder. Er zijn hiervoor drie grids gebruikt met een verschillende mate van verfijning (zie figuur 1):

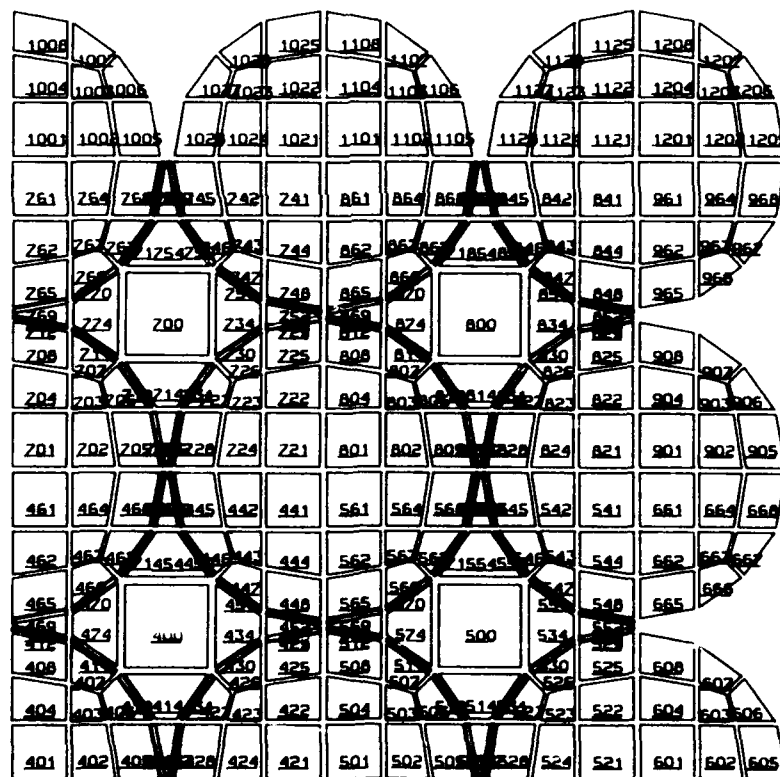
- grove structuur, acht elementen;
- verfijnde structuur, twaalf elementen;
- extra *fijne* structuur, tweeëndertig elementen.



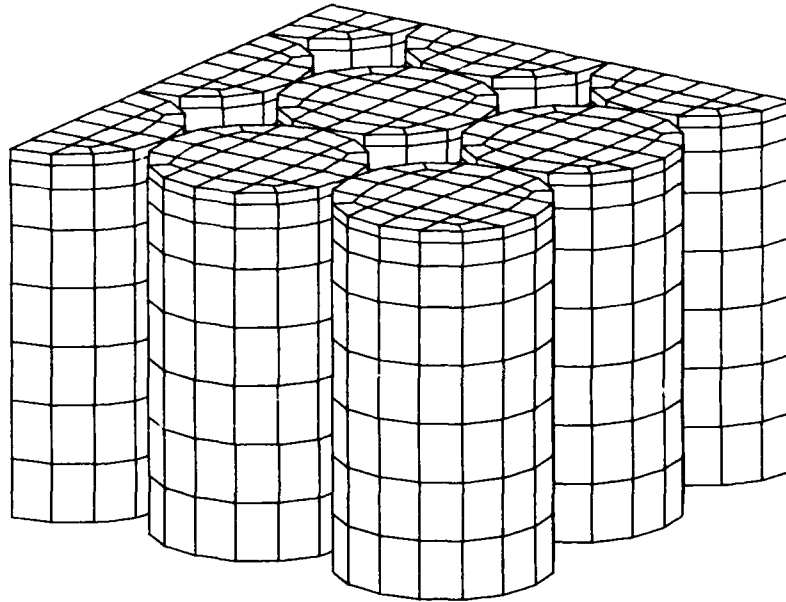


Figuur 1

2-D model voor een enkel vat, verschillende rekenroosters



Figuur 2 2-D model voor vijf bij vijf vaten



**Figuur 3** 3-D model voor twee bij vijf bij vijf vaten

Aangenomen dat alle warmteafvoer langs de zijwanden plaatsvindt. Dit komt overeen met een oneindig hoge stapel.

Vervolgens is van dit model een vereenvoudigde versie gemaakt, door aan te nemen dat de warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen vaten, en de luchtlagen tussen de vaten oneindig hoog is. Daardoor konden de elementen voor warmteoverdracht geëlimineerd worden. Tenslotte is er een drie-dimensionaal model gebruikt, waarbij de oneindige hoogte werd vervangen door een eindige (figuur 3).

**Samengevat:**

- enkel vat, twee-dimensionaal model, oneindig lange cilinder;
- 5x5 vaten, twee-dimensionaal model, oneindig lange cilinders;
- idem zonder speciale warmteoverdrachtselementen;
- 2x5x5 vaten, drie-dimensionaal model, eindige lengte van cilinders.

### 3.3 Toegepaste fysische gegevens van het kruit

De gegevens uit dit onderzoek, die in tabel 1 staan vermeld, zijn afkomstig uit het bestand voor kruitgegevens van het PML-TNO. Het kruit met aanduiding "A" is eerst toegepast. Omdat de resultaten van de berekeningen met dit kruit niet goed te verklaren waren, en niet meer achterhaald kon worden van welke soort kruit deze gegevens afkomstig waren, zijn de berekeningen herhaald met de gegevens van kruit "B". Kruit "C" heeft één van de hoogste warmteproducties van de kruiden die in het bestand voorkomen. Daarmee is het meest ongunstige geval afgedekt.

Tabel 1 Gegevens over de kruiden

Aanduiding in dit rapport van kruitsoort:		"A"	"B"	"C"
Code van het kruit		(onbekend)	KB 6954	KB 5177
Activeringsenergie E	[kJ/mol]	130,5	122,7	120*
Warmteprod. factor $Q_0$	[W/kg]	$0,86 \times 10^{21}$	$5,782 \times 10^{16}$	$1,608 \times 10^{17}$
Calorische waarde	[kJ/kg]	3037	3037	(onbekend)
Soortelijke warmte $C_p$	[J/kgK]	1500	1350*	1350*
Dichtheid p	[kg/m <sup>3</sup> ]	840	840	840*
Warmtegeleidingscoëfficiënt l	[W/mK]	0,08	0,08	0,08*

\* Dit gegeven was onbekend voor deze soort kruit; daarom is een kenmerkende waarde voor kruit genomen.

### 3.4 Gebruikte hard- en software

De simulaties zijn uitgevoerd met het eindige elementen pakket Abaqus, versie 4.9. Dit pakket draait op de Convex supercomputer van het FEL-TNO, Den Haag.

De nauwkeurigheid van de berekening met Abaqus kan worden beïnvloed met enkele parameters. Voor de temperatuur is 0,1 Kelvin de opgegeven tolerantie (TEM TOL). De temperatuur mocht op elk punt maximaal 3 K per rekenstap stijgen (DEL TMX).

## 4 RESULTATEN

### 4.1 Invloed van stapeling op de kritische omgevingstemperatuur

De kritische omgevingstemperatuur is gedefinieerd als de hoogste omgevingstemperatuur, waarbij een hoeveelheid kruit voor onbepaalde tijd kan worden opgeslagen zonder een weglööpreactie te vertonen. Deze grootheid wordt in dit onderzoek gebruikt als maat voor de stabiliteit van een bepaald soort kruit die op een bepaalde manier is opgeslagen. Daarbij gaat het om de stabiliteit van een stapel kruittaten in vergelijking met één enkel vat kruit.

Daartoe is eerst één enkel vat gemodelleerd (alle afmetingen en fysische gegevens staan in hoofdstuk 3 beschreven). Bij een dergelijke eenvoudige geometrie kan de kritische omgevingstemperatuur ook analytisch berekend worden (zie hoofdstuk 2). Ter controle van het model is de waarde die met behulp van simulaties is bepaald vergeleken met deze analytisch berekende waarde. Het resultaat hiervan staat in tabel 2. Hieruit blijkt dat de met simulaties bepaalde kritische temperatuur ongeveer een graad te hoog is. Die nauwkeurigheid is voldoende om bruikbaar te zijn voor het vergelijken van verschillende opslagconfiguraties en voor het beoordelen van de veiligheid van opslagsituaties.

Tabel 2      Vergelijking van simulatie (numeriek) en theorie (analytisch)  
Kritische omgevingstemperatuur in [°C] voor een enkel vat kruit\*

	kruitsoort:		
	"A"	"B"	"C"
theorie	30,8	81,0	64,3
simulatie	31,8	82,0	65,0

\* Voor de kenmerken van de verschillende soorten kruit wordt verwezen naar tabel 1 in hoofdstuk 3

De kritische omgevingstemperatuur voor kruittype "A" is onrealistisch laag. Waarschijnlijk zijn de gebruikte fysische gegevens niet juist. Daarom is de berekening herhaald voor twee andere kruittypen. Kruittype "B" is willekeurig gekozen uit de kruit-databank van het PML-TNO. Om het meest ongunstige geval te kunnen onderzoeken, is het kruit met een van de hoogste warmteproducties uit deze databank gekozen als kruittype "C".

Vervolgens is het resultaat van de simulatie van een enkel vat vergeleken met de simulatie van een stapel vaten. Als tussenstap is een twee-dimensionaal model van vijf bij vijf vaten gebruikt. Dit

komt overeen met een oneindig hoge stapel. Tenslotte is een drie-dimensionaal model van twee lagen met vijf bij vijf vaten doorgerekend. Daarbij is aangenomen dat deze lagen zonder tussenruimte op elkaar staan. Voor de lucht tussen de vaten is een warmtegeleidingscoëfficiënt van 1.0 W/mK aangenomen. Het resultaat van al deze simulaties staat in tabel 3.

Tabel 3      Kritische temperaturen bepaald door simulatie  
Kritische omgevingstemperatuur in [°C]

	kruitsoort:		
	"A"	"B"	"C"
aantal vaten			
1	31,8	82,0	65,0
5x5	19,3	63,9	48,5
2x5x5	22,5	68,6	53,1

Hoe gevoeliger het opgeslagen kruit is voor thermische invloeden, des te lager is de kritische omgevingstemperatuur. Zoals reeds gesteld, komen de resultaten van kruitsoort "A" niet overeen met een realistische kruitsoort, maar ze zijn wel geschikt om de verschillende modellen met elkaar te vergelijken. De kritische omgevingstemperatuur van een stapel met een zeer gevoelig kruit, "C", komt uit rond de 50 °C. Bij de modellen van 1 en van vijf bij vijf vaten vindt de afkoeling uitsluitend plaats via de zijwanden (dit komt overeen met oneindig hoge stapels). Door vijf bij vijf vaten tegen elkaar te zetten daalt de kritische omgevingstemperatuur zo'n zeventien graden ten opzichte van het enkele vat. Het drie-dimensionale model van een stapel met twee lagen is wat realistischer, omdat hier ook afkoeling via de boven- en onderwanden plaats heeft. Dat is in werkelijkheid ook zo. Daardoor wordt de kritische omgevingstemperatuur circa vijf graden hoger dan bij de oneindig hoge stapel (5x5 model). In werkelijkheid is de afkoeling zelfs nog iets beter, omdat er onder elke laag een pallet zit, waarlangs lucht kan stromen. In de praktijk is het ook mogelijk dat de vaten een klein stukje van elkaar af staan. Door deze verschijnselen zal dan de kritische omgevings-temperatuur nog wat hoger uitkomen.

In tabel 4 zijn de kritische temperaturen van één enkel vat en een stapel met 2x5x5 vaten nogmaals onder elkaar gezet om het verschil te laten zien. Hieruit blijkt dat de kritische omgevingstemperatuur bij de hier gesimuleerde omstandigheden tot circa veertien graden lager ligt dan de kritische omgevingstemperatuur voor een enkel vat.

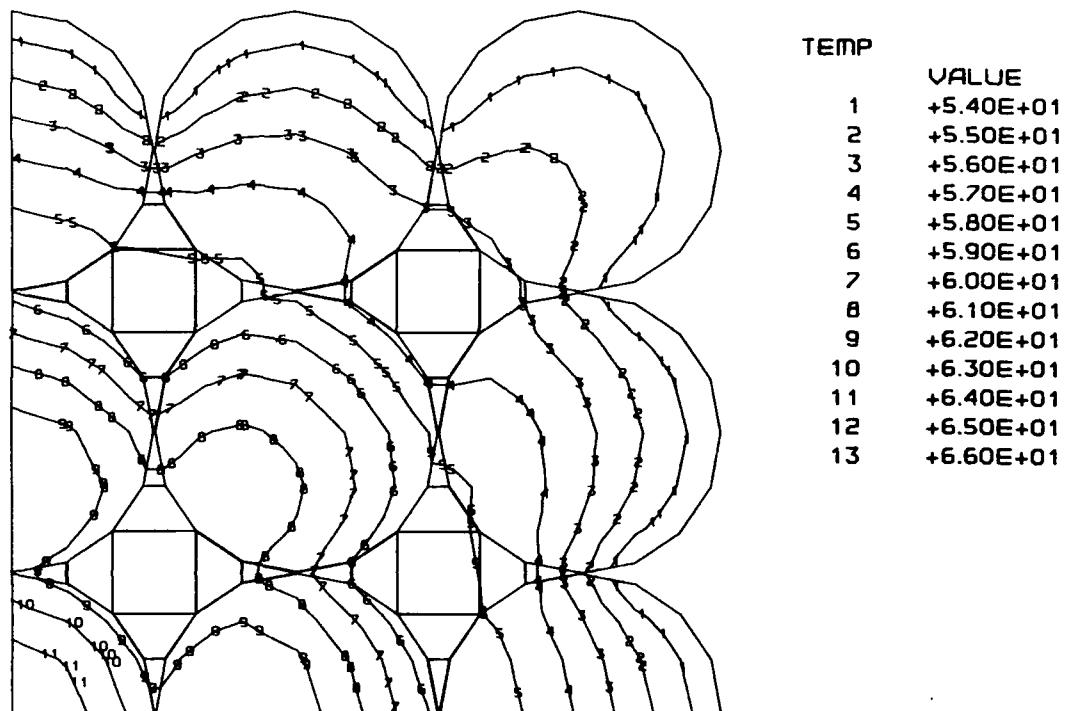
Tabel 4 Invloed van stapeling op de kritische omgevingstemperatuur

configuratie:		kruitsoort:		
		"A"	"B"	"C"
enkel vat	( $T_1$ ) :	31,8	82,0	65,0
stapel	( $T_g$ ) :	<u>22,5</u>	<u>68,6</u>	<u>53,1</u>
verschil	( $T_1 - T_g$ ):	9,3	13,4	11,9

Om de warmtehuishouding in een stapel kruitvaten nader te beschouwen zijn de temperatuurprofielen van een simulatie grafisch weergegeven in figuur 4. Het gaat hier om het uiteindelijke stabiele temperatuurprofiel van kruit "C" in een stapel van 2x5x5 vaten, bij een omgevingstemperatuur van 53°C. Deze temperatuur ligt vlak onder de kritische omgevingstemperatuur (53,1°C). Duidelijk is te zien, dat het middelste punt van de stapel het heetste is (dit punt ligt aan de rand van het model, omdat slechts een representatief segment van de stapel gesimuleerd is). De met lucht gevulde kolommen tussen de vaten zorgen voor een vergrote warmteafvoer naar het bovenvlak van de stapel.

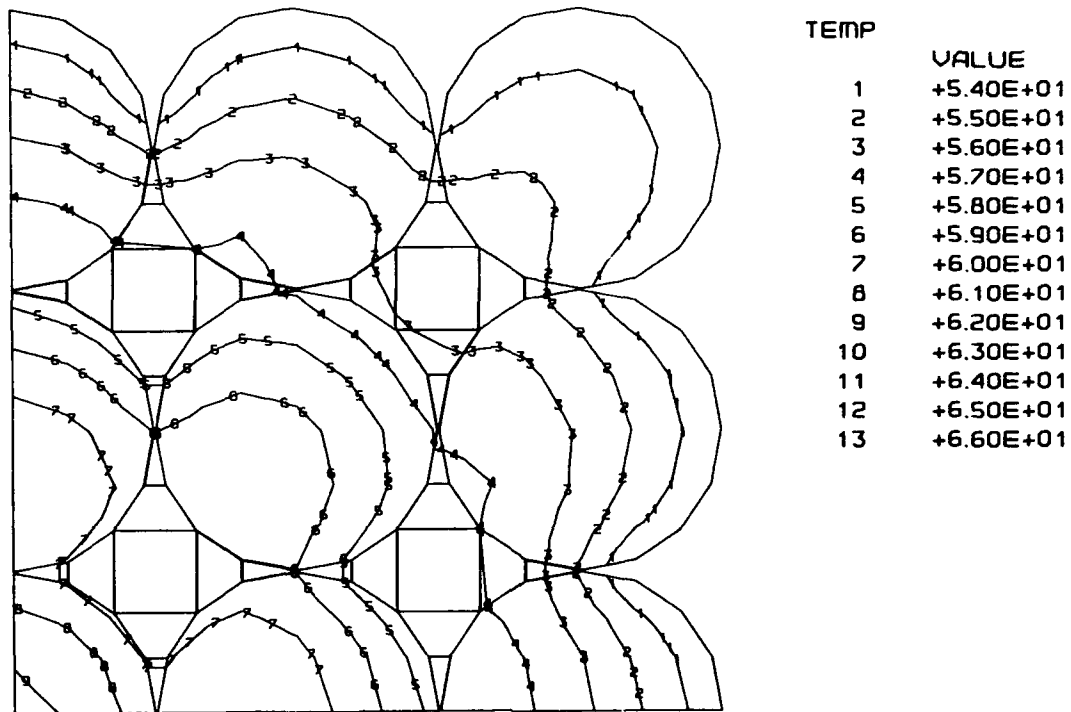
In figuur 5 is het verloop van de temperatuur tegen de tijd uitgezet, voor dezelfde simulatie als bij figuur 4 en tevens voor drie simulaties die een wegloopreactie te zien geven. Aangegeven is de temperatuur in de heetste positie in de stapel: het centrum van het middelste vat.

In alle gevallen loopt de temperatuur de eerste tien dagen circa 5 graden op. Bij de simulatie met een omgevingstemperatuur van 55°C loopt de temperatuur daarna snel op, zodat er binnen de volgende tien dagen een runaway-reactie ontstaat. Bij de simulaties met een omgevingstemperatuur van 54 en 53,5°C neemt de temperatuurstijgsnelheid eerst nog wat af, maar na een aantal maanden treedt er toch nog een runaway op. De vierde curve hoort bij een omgevingstemperatuur van 53°C. Dit is beneden de kritische omgevingstemperatuur, waardoor de situatie stabiel blijft.

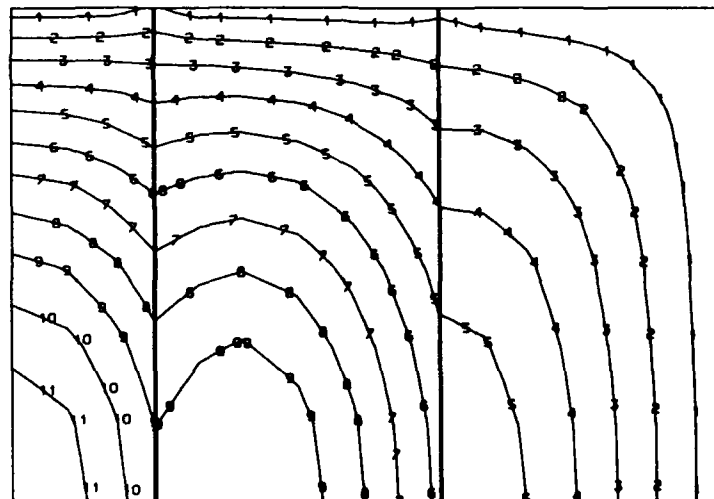


**Figuur 4a**    **Contourplot van een stabiel temperatuurprofiel (in horizontaal vlak tussen beide lagen vaten)**

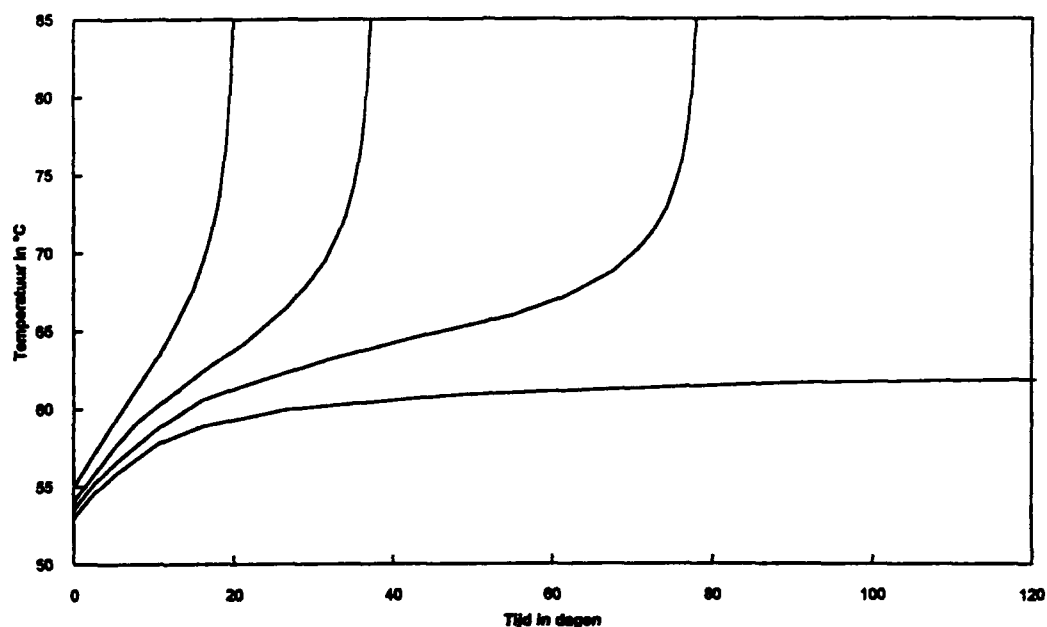




Figuur 4b Contourplot van een stabiel temperatuurprofiel (in horizontaal vlak halverwege de bovenste laag vaten)



Figuur 4c Contourplot van een stabiel temperatuurprofiel (in verticaal vlak midden door het midden van de stapel)



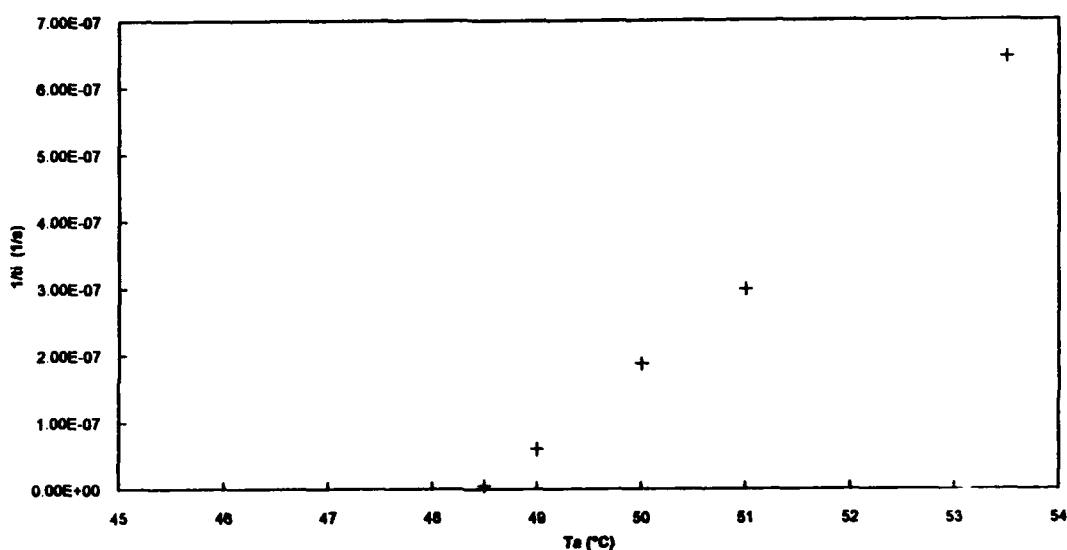
Figuur 5 Temperatuurverloop bij verschillende omgevingstemperaturen (model: 2x5x5 vaten, kruit: KD 5177)

#### 4.2 Verfijning van de berekening van de kritische temperatuur

De kritische omgevingstemperatuur van een opgeslagen hoeveelheid kruit kan als volgt bepaald worden. Er wordt een reeks simulaties uitgevoerd met verschillende omgevingstemperaturen. Als er na een zekere simulatieperiode een stabiel temperatuurprofiel blijkt te ontstaan, moet er een hogere omgevingstemperatuur geprobeerd worden. Als er daarentegen een runaway optreedt, moet de omgevingstemperatuur lager gekozen worden. Deze methode is erg tijdrovend, als de kritische omgevingstemperatuur nauwkeurig berekend moet worden.

Om de bepaling te versnellen, kan gebruik gemaakt worden van de berekende tijd tot runaway (inductietijd  $t_I$ ). Het is namelijk gebleken, dat de inverse van de inductietijd ( $1/t_I$ ) min of meer lineair varieert met de omgevingstemperatuur (zie figuur 6). Door ( $1/t_I$ ) uit te zetten in een grafiek

en te extrapoleren naar ( $1/t_I = 0$ ) kan een schatting van de kritische omgevingstemperatuur worden gevonden. Deze kan als leidraad dienen voor de keuze van de omgevingstemperatuur voor de volgende simulatie. Daardoor kan het aantal benodigde iteraties beperkt worden.



Figuur 6 Relatie tussen de inductietijd en de omgevingstemperatuur

#### 4.3 Gevoeligheidsanalyse

In deze paragraaf wordt nagegaan wat de invloed van verschillende parameters is op de simulatie-resultaten. Daarmee wordt een idee gekregen van de nauwkeurigheid van de resultaten. Ook wordt daarmee duidelijk hoe gevoelig het resultaat is voor een variatie in de waarde van verschillende parameters.

#### 4.3.1 Effect van het gekozen rekenrooster

De invloed van het gekozen rekenrooster is onderzocht aan de hand van het model van een enkel vat. Hiervoor zijn drie verschillende grids gebruikt, met respectievelijk acht, twaalf en tweeeëndertig elementen (zie figuur 1). De gevonden kritische omgevingstemperatuur staat in tabel 5. Bij deze berekening zijn fysische parameters gebruikt van een denkbeeldige kruitsoort, waardoor de gevonden kritische temperaturen als zodanig niet representatief zijn. Uit het resultaat blijkt, dat gridverfijning niet nodig is. Voor het model van een enkele drum is verder het grid van tweeeëndertig elementen gebruikt. Het grid voor de modellen van een stapel vaten is wel gebaseerd op het grofste grid, teneinde het aantal rekenpunten niet te groot te laten worden.

Tabel 5 Kritische omgevingstemperatuur bij verschillende rekenroosters

Kritische omgevingstemperatuur [°C]		
grof grid	(8 elementen)	22,4
fijn grid	(12 elementen)	22,4
extra fijn grid	(32 elementen.)	22,6

#### 4.3.2 Invloed van de warmtegeleidingscoëfficiënt van kruit

Met behulp van de thermische explosie theorie (zie hoofdstuk 2) kan de kritische omgevings-temperatuur voor een oneindig lange cilinder op eenvoudige wijze worden berekend. Daarmee kan ook de invloed van de warmtegeleidingscoëfficiënt van kruit onderzocht worden. Het resultaat van deze berekeningen staat in tabel 6. De fysische gegevens van kruittype "A" zijn toegepast.

Tabel 6 Invloed van de warmtegeleidingscoëfficiënt van kruit

warmtegeleidingscoëfficiënt kruit W/mK]	kritische omgevingstemperatuur [°C]
0,08	30,8
0,10	32,2
0,12	33,3
0,15	34,7

Uit deze resultaten blijkt dat de warmtegeleidingscoëfficiënt van kruit een belangrijke invloed op de kritische omgevingstemperatuur heeft. Een variatie van de warmtegeleidingscoëfficiënt van 0,08 tot 0,15 W/mK geeft circa vier graden verschil in de kritische omgevingstemperatuur.

#### 4.3.3 Invloed van de warmteoverdrachtscoëfficiënt

Er vindt warmteoverdracht plaats tussen het kruit en het verpakkingsmateriaal en tevens tussen verpakking en de lucht in de omgeving. De warmteflux door het buitenoppervlak is evenredig met het temperatuurverschil tussen de buitenrand van het kruit en de lucht er omheen. De evenredigheidsconstante is de warmteoverdrachtscoëfficiënt en voor vrije convectie is de waarde daarvan tussen de 3 en de 20 W/Km<sup>2</sup> [3]. De warmteoverdrachtscoëfficiënt heeft geen grote invloed op de kritische omgevingstemperatuur, want de grootte van de warmtestroom wordt vooral bepaald door de warmtegeleidbaarheid van het kruit zelf. In dit onderzoek is een warmteoverdrachtscoëfficiënt van 6 W/km<sup>2</sup> genomen. Om de invloed hiervan nader te onderzoeken, zijn ook enkele simulaties uitgevoerd met een twee maal zo grote warmteoverdrachtscoëfficiënt. De resultaten hiervan staan in tabel 7. De fysische gegevens van kruittype "A" en het model van een enkel kruitvat zijn gebruikt (zie hoofdstuk 3). De conclusie is dat de invloed van de warmteoverdrachtscoëfficiënt zeer gering is.

Tabel 7 Invloed van de warmteoverdrachtscoëfficiënt

warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/m <sup>2</sup> K]	kritische omgevingstemperatuur [°C]
6.0	31.8
12.0	32.1

#### 4.3.4 Invloed van interface-elementen in het model

In het oorspronkelijk model van 5x5 kruitvaten zijn interface-elementen opgenomen, waarmee de warmteoverdracht tussen het kruit en de lucht tussen de kruitvaten wordt uitgerekend. Hierboven is reeds vermeld, dat de warmteweerstand voornamelijk bepaald wordt door de warmtegeleidbaarheid van het kruit zelf, zodat de waarde van de warmteoverdrachtscoëfficiënt weinig invloed op de resulterende warmtestromen heeft. Daarom zijn deze interface-elementen uit het model verwijderd, ten einde de benodigde rekentijd te beperken. De invloed van deze vereenvoudiging op de kritische omgevingstemperatuur is te zien in tabel 8. De gebruikte kruitgegevens zijn van kruittype "A" en het model is van 5x5 kruitvaten (met en zonder interface-elementen, zie hoofdstuk 3).

Tabel 8      Invloed van de interface-elementen in het model

model	kritische omgevingstemperatuur [°C]
met interface-elementen	19,2
zonder interface-elementen	19,3

De interface-elementen kunnen dus zonder noemenswaardig verlies aan nauwkeurigheid uit het model weggelaten worden. De resultaten van paragraaf 4.1 zijn verkregen met het model zonder interface-elementen. De simulaties die in paragraaf 4.3.5 worden beschreven waren reeds uitgevoerd met het model met interface-elementen. In het drie-dimensionale model zijn geen interface-elementen toegepast.

#### 4.3.5      Invloed effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht

In hoofdstuk 2 is uiteengezet, dat de warmtestromen door de luchtruimtes tussen de kruitvaten met de hier gebruikte methode niet exact te beschrijven zijn. Er is daarom een benaderende methode gebruikt, waarbij aan de lucht een verhoogde warmtegeleidingscoëfficiënt is toegekend. Daarbij is het warmtetransport ten gevolge van de beweging van de lucht mede verdisconteerd in de warmtegeleidingscoëfficiënt. De warmtegeleidingscoëfficiënt van een stagnante (onbeweeglijke) luchtlag is 0,024 W/mK (bij 273 K) [3]. De warmtegeleidingscoëfficiënt van kruit ligt ongeveer tussen 0,08 en 0,15 W/mK. In het model waarmee de overige berekeningen zijn gedaan, is de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht op 1,0 W/mK gesteld. Om de invloed van deze parameter te onderzoeken, zijn een aantal simulaties met een hogere of lagere effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht uitgevoerd. De resultaten hiervan, die zijn verkregen voor kruittype "A" en het model met 5x5 kruitvaten (zie hoofdstuk 3), staan in tabel 9. Ter vergelijking: de kritische omgevingstemperatuur voor een enkel vat komt op 31,8°C.

Tabel 9      Invloed van de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht

effectieve warmte-geleidingscoëfficiënt [W/mK]	kritische omgevingstemperatuur [°C]
0,08	15,5
1,0	19,2
10,0	22,3

Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt een belangrijke invloed heeft op de kritische omgevingstemperatuur. Als een tien maal zo lage waarde voor de warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht wordt genomen, komt de kritische omgevingstemperatuur circa vier graden lager uit.

Een overzicht van de uitgevoerde simulaties staat in bijlage 1.

## 5                    CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1                Conclusies

Bij de opslag van kruit kan er ontbranding ten gevolge van zelf-opwarming plaatsvinden, indien de omgevingstemperatuur boven een kritische waarde ligt. Deze kritische omgevingstemperatuur hangt niet alleen van de eigenschappen van het kruit af, maar ook van de omvang van de verpakkingseenheden en de wijze waarop deze gestapeld zijn. In het in dit rapport beschreven onderzoek is de invloed van stapeling op de kritische omgevingstemperatuur onderzocht door middel van numerieke simulatie. Door middel van deze simulaties is een beeld gevormd van de warmtestromen in een opgeslagen hoeveelheid kruit. Het is tevens duidelijker geworden hoe het temperatuurniveau waarbij kruit veilig kan worden opgeslagen beïnvloed wordt door de wijze van opslag.

De nu volgende conclusies zijn van toepassing op enkele kruitsoorten die in een veel gebruikt type cilindervormige kruitvaten opgeslagen zijn, op een stapel van twee lagen van vijf bij vijf vaten, zoals beschreven in hoofdstuk 3.

- Bij de onderzochte stapel kruitvaten bleek de kritische omgevingstemperatuur tien tot vijftien graden lager dan de kritische omgevingstemperatuur van een enkel vat.
- Voor een kruitsoort met een relatief hoge warmteproductie (KD 5177) ligt de kritische omgevingstemperatuur voor een stapel vaten met kruit rond de 50°C. Bij een andere onderzochte kruitsoort (KD 6954) ligt deze waarde rond de 65 °C.
- De waarde van de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van de lucht tussen de vaten heeft een grote invloed op de kritische omgevingstemperatuur. Bij de meeste simulaties is een waarde van 1,0 W/mK aangenomen. Bij een waarde van 0,08 W/mK werd de kritische omgevings-temperatuur circa vier graden verlaagd. Bij een waarde van 10 W/mK werd de kritische omgevingstemperatuur daarentegen drie graden hoger.
- De inverse van de inductietijd of tijd-tot-runaway bij temperaturen die iets boven de kritische omgevingstemperatuur liggen blijkt min of meer lineair te variëren met de omgevings-temperatuur. Dit verschijnsel kan toegepast worden om het aantal benodigde iteraties bij het numeriek bepalen van de kritische omgevingstemperatuur te beperken.
- De warmtegeleidingscoëfficiënt van kruit heeft een belangrijke invloed op de kritische omgevingstemperatuur. Een variatie van de warmtegeleidingscoëfficiënt van 0,08 tot 0,15 W/mK geeft circa vier graden verschil in de kritische omgevingstemperatuur.
- De grootte van de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor de warmteoverdracht tussen het vat en de omgeving heeft weinig invloed op de kritische omgevingstemperatuur. Er zijn twee simulaties uitgevoerd met een warmteoverdrachtscoëfficiënt van respectievelijk 6 en 12 W/m<sup>2</sup>K. Het verschil in kritische omgevingstemperatuur dat daaruit voortvloeide was slechts 0,3°C.



## 5.2 Aanbevelingen

- In het hier beschreven onderzoek is de temperatuur in de omgeving van de stapel als een constante beschouwd. De totale voorraad kruit kan echter een aanzienlijke hoeveelheid warmte afgeven, waardoor de omgevingstemperatuur zou kunnen stijgen. Om dit na te gaan is het nuttig om de maximale warmteproductie van de stapel uit te rekenen bij een omgevings-temperatuur in de buurt van de kritische waarde.
- Het is nuttig om na te gaan of het gedrag van een stapel kruitvaten ook met een veel eenvoudiger model ingeschat kan worden. Daarvoor zou de stapel als een enkel homogeen blok gemodelleerd moeten worden, waarbij de fysische parameters op een bepaalde manier uit de parameters van kruit en lucht afgeleid worden. Hiermee zou ook weer de kritische omgevings-temperatuur en de tijd-tot-runaway voor verschillende omstandigheden uitgerekend kunnen worden.
- Tot nu toe is aangenomen dat de begintemperatuur van het kruit gelijk is aan de omgevings-temperatuur. Dat hoeft in de praktijk niet altijd het geval te zijn, bijvoorbeeld als het kruit nog warm is van het productieproces. Zo blijkt uit een zeer recente publicatie [4], dat het plaatsen van een warm vat energetisch materiaal in een, ter compensatie, koele cel maar een zeer gering effect te hebben op de kritische temperatuur van het vat: ongeveer 11°C daling van de kritische temperatuur bij een temperatuurdaling van 140°C van de omgeving! Deze berekeningen werden uitgevoerd voor een enkel kubisch vat. Aanbevolen wordt om de invloed stapeling op interne kritische vattertemperatuur in relatie met de omgevingstemperatuur door middel van simulaties nader te onderzoeken.
- Om de warmtestromen in de luchtlagen in de stapel nog beter te onderzoeken is experimenteel onderzoek wenselijk. Dit onderzoek zou ondermeer moeten resulteren in een betrouwbare schatting van de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht ten behoeve van simulaties. Als het experiment vooral op het onderzoeken van de warmtestromen tussen de vaten is gericht, kan het uitgevoerd worden met een inerte stof voorzien van elektrische verwarming. Daarmee worden problemen met de veiligheid voorkomen.


6

ONDERTEKENING



Dr. B.J. van der Meer  
(projectleider)

---



Ir. J.C. Lont  
(auteur)

## 7            REFERENCES

- 1 J.L.C. van Geel, Safe radius of heat generating substances, *Industrial and Engineering Chemistry*, 58 (1966), p. 24
- 2 P.C. Bowes, *Self-heating: evaluating and controlling the hazards*, Elsevier, Amsterdam (1984)
- 3 U. Grigull und H. Sandner, *Wärmeleitung*, Springer-Verlag, Berlin (1979)
- 4 J.F. Griffiths and W. Kordylewski, The prediction of spontaneous ignition hazards resulting from the "hot stacking" of process materials, *Plant/Oper. Progress*, 11 (1992), p. 77

## BIJLAGE 1 OVERZICHT VAN SIMULATIERUNS

In de volgende tabel zijn van de uitgevoerde simulatieruns de volgende gegevens opgenomen:

- naam van de simulatie-run (volgnummer)
- model :
  - 1a : model van 1 vat (bestaande uit 8 elementen)
  - 1b : model van 1 vat (bestaande uit 12 elementen)
  - 1c : model van 1 vat (bestaande uit 32 elementen)
  - 55 : model van 5 bij 5 vaten
  - 55z : model van 5 bij 5 vaten zonder interface-elementen
  - 255 : model van 2 lagen van 5 bij 5 vaten
- kruitsoort:
  - "A", "B" of "C" : zie hoofdstuk 3,
  - "X": activeringsenergie 115 kJ/mol;
  - warmteproductiefactor:  $0,775 \times 10^{19}$  W/kg;
  - dichtheid: 840 kg/m<sup>3</sup>;
  - warmtegeleidingscoëfficiënt: 0,08 W/mK;
  - soortelijke warmte: 1300 J/kgK.
- omgevingstemperatuur ( $T_A$ )
- optreden runaway (r.a.):
  - +: wel een runaway;
  - : geen runaway;
  - +/-: twijfelgeval.
- maximaal bereikte temperatuur in warmste punt ( $T_{max}$ )
- tijd-tot-runaway (inductietijd) in uren ( $t_I$ )
- opmerkingen :
  - $T_i$ : initiële temperatuur van het kruit
  - h: warmteoverdrachtscoëfficiënt
  - $l_i$ : effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht

Tabel 1.1 Overzicht van simulatieruns

run	model	kruit	T <sub>A</sub> [°C]	r.a.	T <sub>max</sub> [°C]	t <sub>I</sub> uur	opmerkingen
k2	1a	"X"	22	-	25,6		T <sub>i</sub> = 23°C
k4	1a	"X"	23	+		406	
k4	1a	"X"	24	+		148	
k3	1a	"X"	27	+		48	
k1	1a	"X"	32	+		16	
k2f	1b	"X"	22	-	28,1		T <sub>i</sub> = 23°C
k4f	1b	"X"	23	+		360	
k2ff	1c	"X"	22	-	28,1		T <sub>i</sub> = 23°C
k4ff	1c	"X"	23	+/-	33,13		
k3ff	1c	"X"	24	+		162	
kb2	1c	"A"	28	-	30,4		
kb3	1c	"A"	30	-	34,2		
kb4	1c	"A"	31	-	37,2		
kb5	1c	"A"	31,5	-	39,9		
kb1	1c	"A"	32	+		770	
kb7	1c	"A"	32	-	40,8		h = 12 W/m <sup>2</sup> K
kb8	1c	"A"	33	+		215	h = 12 W/m <sup>2</sup> K
kb6	1c	"A"	34	+		102	h = 12 W/m <sup>2</sup> K
ka3	55	"A"	18	-	23,0		l <sub>I</sub> = 1,0 W/mK (normaal)
ka6	55	"A"	19	-	27,1		"
ka4	55	"A"	20	+		2256	"
ka2	55	"A"	22	+		648	"
ka1	55	"A"	32	+		64	"
ka19	55	"A"	20	-	23,4		l <sub>I</sub> = 10 W/mK
ka20	55	"A"	21	-	25,9		"
ka21	55	"A"	22	-	30,1		"
ka18	55	"A"	23	+		1656	"
ka8	55	"A"	27	+		± 250	"
ka22	55	"A"	22	-	27,0		l <sub>I</sub> = 1000 W/mK

Tabel 1.1 Overzicht van simulatieruns (vervolg)

run	model	kruit	T <sub>A</sub> [°C]	r.a	T <sub>max</sub> [°C]	t <sub>i</sub> uur	opmerkingen
ka10	55	"A"	15	-	20,6		I <sub>1</sub> = 0,08 W/mK
ka9	55	"A"	16	+		6960	I <sub>1</sub> = 0,08 W/mK
ka7	55	"A"	18	+		1368	I <sub>1</sub> = 0,08 W/mK
kc1	55z	"A"	19	-	26,3		
kc2	55z	"A"	20	+		2717	
kc3	55z	"A"	21	+		1146	
kd3	255	"A"	21	-	25,0		
kd7	255	"A"	22,5	-	30,0		
kd8	255	"A"	23	+		1556	
kd6	255	"A"	24	+		530	
kd5	255	"A"	25	+		333	
ke6	1c	"B"	82	-	?		
ke4	1c	"B"	82,5	-		±583	
ke2	1c	"B"	84	-		140	
ke3	1c	"B"	86	-		72,8	
kf2	55z	"B"	62	-	67,8		
kf5	55z	"B"	63,5	-	73,8		
kf4	55z	"B"	64	+/-	79,0		
kf3	55z	"B"	65	+		2314	
kf1	55z	"B"	66	+		1205	
kg1	255	"B"	68	-	75,7		
kg3	255	"B"	69	+/-	81,6		
kg2	255	"B"	70	+		875	
kg4	255	"B"	71	+		505	
kh5	1c	"C"	64,5	-	73,5		
kh4	1c	"C"	65	+/-	77,3		
kh1	1c	"C"	66	+		287	
kh2	1c	"C"	67	+		140	
kh3	1c	"C"	68	+		93,4	

Tabel 1.1      Overzicht van simulatieruns (vervolg)

run	model	kruit	T <sub>A</sub> [°C]	r.a.	T <sub>max</sub> [°C]	t <sub>l</sub> uur	opmerkingen
ki7	55z	"C"	43,5	-	46,3		
ki5	55z	"C"	48	-	61,4		
ki4	55z	"C"	48,5	+/-		53083	
ki3	55z	"C"	49	+		4564	
ki1	55z	"C"	50	+		1476	
ki2	55z	"C"	51	+		928	
ki6	55z	"C"	53,5	+		431	
kk1	255	"C"	53	-	65,0		
kk4	255	"C"	53,5	+		1886	
kk2	255	"C"	54	+		905	
kk3	255	"C"	55	+		491	

**REPORT DOCUMENTATION PAGE**

(MOD NL)

1. DEFENSE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD92-3699	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER PML1993-9
4. PROJECT/TASK/WORKUNIT NO. 221092237	5. CONTRACT NUMBER R87/KL/001	6. REPORT DATE January 1993
7. NUMBER OF PAGES 31 (1 Annex)	8. NUMBER OF REFERENCES 4	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE The influence of stacking powder kegs on safe warehouse temperatures (De invloed van de stapeling van vaten kruit op de veilige opslagtemperatuur)		
11. AUTHOR(S) J.C. Lont		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Prins Maurits Laboratory P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) DMKL/Bureau Hinderwetzaken P.O. Box 90822, 2509 LV The Hague		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation: ONGERUBRICEERD is equivalent to: UNCLASSIFIED		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) <p>A commonly used safety criterion for the storage of gunpowder is the critical diameter. This dia-meter must not be exceeded by a stored package of gunpowder to ensure that the heat production caused by slow decomposition reactions can be compensated by loss of heat to the surroundings. This safety criterion is normally applied to the size of a single package. However, the cooling effect can be decreased by the close stacking of packages in a storage area, which could render the system unstable.</p> <p>A stack of two layers of twenty-five closely packed drums of powder was modelled using a finite element method and the results were compared with the behaviour of a single drum. The heat flow in the space between the drums was modelled using an effective conductivity of 1 W/mK.</p> <p>The stack had a 10 to 15°C lower critical ambient temperature as compared to the single drum. Critical ambient temperatures as low as approximately 50°C were encountered. The (effective) conductivity of the powder and the air between the drums are the most important factors that determine the thermal stability of the stack.</p>		
16. DESCRIPTORS Safety Storage Drums Computer programs Finite Element Methods Computerized Simulation		IDENTIFIERS Propellants Thermal Explosion Heat Transmission Thermal Stability
17A. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) ONGERUBRICEERD	17B. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) ONGERUBRICEERD	17C. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) ONGERUBRICEERD
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution		17D. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) ONGERUBRICEERD



### Distributielijst

- 1 DWOO
- 2 HWO-KL
- 3/4 HWO-KLu
- 5 HWO-KM
- 6/10 DMKL Bureau Hinderwetzaken  
Drs. ing. I. van den Bos
- 11/13 TDCK
- 14 Hoofddirecteur DO-TNO
- 15 Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. drs. P.J. van den Berg
- 16 Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. ir. M.A.W. Scheffelaar
- 17 Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. ir. H. Wittenberg
- 18 PML-TNO, Directeur; daarna reserve
- 19 PML-TNO, Directeur Programma; daarna reserve
- 20 PML-TNO, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid  
Hoofd Groep Energetische Materialen
- 21 PML-TNO, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid  
Groep Energetische Materialen, auteur
- 22 PML-TNO, Documentatie
- 23 PML-TNO, Archief